



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Սառը ատոմների փորձը ստուգում է քվանտային գրավիտացիայի «Ժամանակի խնդիրը»՝ որպես լաբորատոր անալոգ, ոչ պատասխան

Կանոնական քվանտային գրավիտացիայում Wheeler-DeWitt հավասարումը իրադարձությունները հերթագրող արտաքին ժամացույց չունի՝ սա «Ժամանակի խնդիրը» է: Միահեղինակ փորձը մեկուսացնում է Bose-Einstein կոնդենսատը, բարակ օպտիկական պատնեշով բաժանում չդիտվող և դիտվող հատվածների ու դրանց միջև հոսող էնտրոպիայից կառուցում ներքին ժամացույց: Այդ «էնտրոպիկ ժամանակը» հերթագրում է դիտվող հատվածի ընդարձակումը և հետկծկումը, իսկ արդյունավետ հավասարումը վերարտադրում է չափված տվյալները ուսումնասիրված ցածր պատնեշի դեպքում: Սա հարաբերական ժամանակի գաղափարների վերահսկվող փորձադաշտ է. «մեծ պայթյունը», «մեծ կծկումը» և «մինի-տիեզերքը» թակարդված գազի անալոգային պիտակներ են, ոչ իրական տիեզերագիտություն, և աշխատանքը չի պնդում լուծել ժամանակի կամ քվանտային գրավիտացիայի խնդիրը:

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Testing the problem of time with cold atoms*, Giovanni Barontini, Physical Review Research 8, L022047 (2026) · DOI: 10.1103/1h9j-df4k

Թակարդի ներսում Էնտրոպիայից կառուցված ժամացույց

Կանոնական քվանտային գրավիտացիայում կա տարօրինակ ու համառ խնդիր. կենտրոնական հավասարման մեջ ժամանակ ընդհանրապես չկա: Wheeler-DeWitt հավասարումը, որը ամբողջ տիեզերքի համար Schrodinger հավասարմանը ամենամոտ քանն է, պարզապես ասում է, որ որոշ օպերատոր վիճակի վրա գործելիս զրո է տալիս: Չկա արտաքին պարամետր, որը «տկտկում» է, չկա «առաջ»-ն ու «հետո»-ն հերթագրող որևէ բան, մինչդեռ մենք ակնհայտորեն զգում ենք ժամանակի անցումը: Սա **ժամանակի խնդիրն** է, և ավելի քան կես դար այն վերջնական լուծում չի ստացել:

Ֆիզիկական գրախոսություն Research-ի միահեղինակ հոդվածը այն չի լուծում: Այն անում է ավելի հանգիստ և իր ձևով ավելի օգտակար մի բան. կառուցում է փոքր, լավ վերահսկվող լաբորատոր համակարգ, որտեղ առաջարկվող պատասխանների մի ամբողջ ընտանիք կարելի է **ստուգել իրական տվյալների դեմ**: University of Birmingham-ի Giovanni Barontini-ն վերցնում է Bose-Einstein կոնդենստ՝ գերսառը ատոմների ամպ, որը պահվում է մեկ քվանտային օբյեկտի պես, և այն դարձնում անալոգ, որի վրա «ներքին»՝ հարաբերական ժամանակի գաղափարը կարելի է չափել, ոչ միայն քննարկել: Հնարքն արտաքին վայրկյանաչափից ժամացույց կառուցելը չէ, այլ համակարգի ներսում վերաբաշխվող Էնտրոպիայից:

«Ժամանակի խնդրի վերահսկվող անալոգի» և «Ֆիզիկոսները լուծեցին ժամանակը» պնդումների միջև հեռավորությունն այս ամբողջ պատմությունն է, և այդ հեռավորությունը մեծ է:

Ինչ արեց հետազոտողը

Սարքավորումը մոտ **24,000 ռուբիդիում-87 ատոմից** Bose-Einstein կոնդենսատ է, որը պահվում է պահպանողական օպտիկական դիպոլային թակարդում և տատանման է դրվում՝ ամբողջ ատոմային ամպը թակարդում հետ ու առաջ շարժվում է: **Քարակ օպտիկական պատնեշը**՝ մոտ 8 միկրոմետր լայնությամբ և թվային միկրոհայելային սարքով 675 nm լույսով «նկարված», թակարդը բաժանում է երկու կեսի: Մի կեսը դիտվում է՝ «**պայծառ sector**», մյուսը՝ ոչ՝ «**մութ sector**»: Փորձի մոտ 100 միլիվայրկյան պատուհանի ընթացքում համակարգը չափելի մասնիկային կորուստ կամ դիսիպացիա չի ցույց տալիս, այնպես որ լավ մոտարկմամբ այն փակ համակարգ է՝ Hamiltonian-ով, որն ինքնին ժամանակից կախված չէ:

[figure_pair pending]

Չախում մագնիսաօպտիկական թակարդը ապակե խցիկում ստեղծում է ռուբիդիումի սառը ամպը՝ կոնդենսատը պատրաստելու ճանապարհի վաղ սառեցման փուլը: Աջում

Giovanni Barontini-ն կանգնած է օպտիկական սարքավորման կողքին: Մրանք փորձի հիմքում եղած լաբորատոր համակարգի լուսանկարներ են, ոչ բառացի մանրանկարչական տիեզերքի պատկերներ:

Սովորական լաբորատոր ժամացույցով՝ յուրաքանչյուր 2 ms-ին մեկ կլանման պատկերով դիտելիս պայծառ sector-ը մի արտահայտիչ բան է անում: Ատոմները անցնում են պատնեշով, և հատվածը ոչնչից աճում է (Barontini-ն այդ պահը կոչում է «**մեծ bang**»), հասնում առավելագույն չափի, ապա կծկվում ու դատարկվում դեպի մութ sector («**մեծ crunch**»): Կախված պատնեշի բարձրությունից՝ սա կարող է ցիկլային կրկնվել:

Հետո գալիս է իրական հարցը: Լաբորատոր ժամացույցը համակարգի համար *արտաքին* է՝ հենց այն տեսակի բան, որը Wheeler-DeWitt-ի պայմաններում թույլատրված չէ: Ուստի Barontini-ն հարցնում է. կարելի՞ է պայծառ sector-ի պատմությունը **հերթագրել միայն համակարգի ներքին մեծություններով**: Նրա պատասխանը ժամացույց է, որը նա կոչում է **Էնտրոպիկ ժամանակ**, և այն նույն պատկերներից կարդացվում է երեք պարզ քայլով: Նախ՝ յուրաքանչյուր կլանման պատկերից պայծառ sector-ի համար հանում է չորս թիվ՝ ատոմների թիվը, խտության պրոֆիլի զանգվածի կենտրոնը (որը անալոգային «սկայար դաշտի» դեր է խաղում), լայնությունը և Էնտրոպիան՝ մեկ ատոմի Էնտրոպիան ստանդարտ մեթոդով ստացված և բազմապատկված ատոմների թվով: Երկրորդ՝ երբ ատոմները անցնում են պատնեշով, այդ Էնտրոպիան բարձրանում և իջնում է: Երրորդ՝ ժամացույցը հետևում է Էնտրոպիայի գրադիենտին չափված զանգվածի կենտրոնի ուղու երկայնքով՝ հաշվելով յուրաքանչյուր տեղաշարժի մեծությունը, ոչ ուղղությունը: Երբ Էնտրոպիան և զանգվածի կենտրոնը միասին բարձրանում կամ իջնում են, յուրաքանչյուր քայլ առաջ է տանում ժամացույցը նույնիսկ ամպի շրջվելու դեպքում: Տվյալներում սա գրեթե ամենուր տալիս է մեկ ուղղված հերթագրում հատվածի «մեծ bang»-ից մինչև «մեծ crunch», բացառությամբ մի քանի փոքր տատանումների, որտեղ կոպիտ նմուշառումը ստիպում է երկու փոփոխություններին չհամընկնել:

Վերջում նա բերում է արդյունավետ **«Էնտրոպիկ ժամանակի Schrodinger հավասարում»**՝ պայծառ sector-ի Էվոյուցիայի հավասարում, գրված այս ներքին ժամացույցով արտաքինի փոխարեն, և թվային լուծում է այն՝ ստուգելու՝ արդյոք վերարտադրում է տեսախցիկով իրականում գրանցվածը:

Ինչ գտավ

Երեք արդյունք՝ աճող հավակնությամբ:

- **Ներքին ժամացույցը աշխատում է որպես հերթագրում:** Էնտրոպիկ ժամանակը գրեթե ամենուր միատոն աճում է, իսկ դրա արագությունը որոշվում է Էնտրոպիայի՝ պատնեշով փոխանակման արագությամբ. այն արագանում է, երբ Էնտրոպիա է փոխանակվում, և **լրիվ կանգնում, երբ փոխանակում չկա**: Հետադարձելի, ցածր պատնեշի ռեժիմում մեծ crunch-ի և հաջորդ մեծ

bang-ի միջև *ներքին ժամանակ ընդհանրապես չի անցնում*, որովհետև այնտեղ Էնտրոպիա չի փոխանակվում, թեև լարորատոր ժամացույցը շարունակում է տկտկալ: Ամբողջ տվյալաշարում երկու հատվածների ընդհանուր Էնտրոպիան սխալի միջակայքների ներսում հաստատուն է մնացել, ինչպես պահանջվում է փակ համակարգից:

- **Տարբեր ռեժիմները տարբեր «ժամանակներ» են տալիս:** Բարձրացրեք պատմեշը, Էնտրոպիայի փոխանակումը նվազում է, և ներքին ժամացույցը դանդաղում է: Հասցրեք այն կետին, որտեղ հատվածները գրեթե չեն հաղորդակցվում, և պայծառ sector-ը մոտենում է այն վիճակին, որը հոդվածը կոչում է «**ջերմություն death**»՝ ստացիոնար վիճակ, որտեղ Էնտրոպիկ ժամանակը պարզապես կանգնում է:
- **Արդյունավետ հավասարումը վերարտադրում է տվյալները:** Էնտրոպիկ ժամանակի Schrodinger հավասարումը՝ փորձարարական պարամետրերով սնուցված, թվային կերպով վերարտադրում է ամպի լայնության չափված Էվոյուցիան: Հոդվածը հաղորդում է գերազանց համապատասխանությունն ցածր պատմեշի դեպքի համար, որտեղ Էնտրոպիայով պայմանավորված անդամը գերիշխում է. բացահայտ թվային համեմատությունը հենց այդ դեպքի համար է:

Ինչ է «ժամանակի խնդիրը», և ինչ է այստեղ «Էնտրոպիկ ժամանակը»

Ժամանակի խնդիրն այն է, որ կանոնական քվանտային գրավիտացիայի գլխավոր հավասարումը՝ Wheeler-DeWitt-ը, արտաքին ժամանակային փոփոխական չունի: Տարածված պատասխաններից մեկը *հարաբերական* մոտեցումն է. համակարգի ներսի մեկ ֆիզիկական մեծություն դարձնել «ժամացույց» և մնացած ամեն ինչ նկարագրել նրա նկատմամբ: Կրկնվող դժվարությունն այն է, որ բնական ժամացույցային ընտրությունները միշտ չէ, որ միատոն են. նորից կծկվող համակարգում թեկնածու ժամացույցը առաջ է գնում, ապա հետ, ուստի չի կարող մաքուր մեկ ուղղություն պիտակավորել սկզբից մինչև վերջ:

Էնտրոպիկ ժամանակը Barontini-ի շրջանցումն է: Դիրքի նման փոփոխական կարդալու փոխարեն նա ժամացույցը կառուցում է դիտվող և չդիտվող հատվածների միջև *փոխանակվող Էնտրոպիայից* այնպես, որ այն չըջվի: Հոգով այն մոտ է ավելի հին «thermal ժամանակ» գաղափարներին, բայց այստեղ սահմանվում է գործառնականորեն՝ չափելի Էնտրոպիական հոսքից, ոչ վերացական մաթեմատիկական կառուցվածքից: Հենց դա էլ այն դարձնում է իրական սարքավորման վրա ստուգելի:

Կարևոր է. տիեզերագիտական բառերը՝ «մեծ bang», «մեծ crunch», «սանդղակ գործոն», «scalar դաշտ», «miniuniverse», **անալոգային պիտակներ** են: Դրանք անվանում են թակարդված ատոմային գազի հատկանիշներ, որոնք կառուցվածքային նմանություն ունեն պարզեցված տիեզերագիտական մոդելների հավասարումների հետ: Դրանք իրական տիեզերքի մասին պնդումներ չեն:

Ինչ սա չի ապացուցում

Այստեղ զգուշությունն ամենակարևորն է, որովհետև բառապաշարը հեշտ է չափազանցության հասցնել:

- **Այն չի լուծում ժամանակի խնդիրը և չի էլ պնդում լուծել:** Հոդվածի սեփական ձևակերպումն այն է, որ այն «ստեղծում է վերահսկվող փորձարարական միջավայր, որտեղ հարաբերական ժամանակի կառուցումները կարելի է քանակապես ստուգել»: Փորձադաշտը թեորեն չէ: Քվանտային գրավիտացիայում հարաբերական կամ էնտրոպիկ ժամանակը ժամանակի ճիշտ նկարագրությունն է, թե ոչ՝ մնում է նույնքան բաց, որքան նախկինում:
- **Սա անալոգ է, ոչ տիեզերք:** Ոչ մի տիեզերագիտություն չի դիտվում: Դիտվում է թակարդում Bose-Einstein կոնդենսատ, որի նվազեցված նկարագրությունը *մաթեմատիկորեն նման է* պարզեցված («minisuperspace») տիեզերագիտական մոդելի: Նմանությունն է փորձի իմաստը և միաժամանակ նրա սահմանը: Այստեղ ոչինչ չի ցույց տալիս, որ վաղ տիեզերքն ունեցել է այս տեսակի մեծ bang, որ տարածաժամանակը ատոմներից է կազմված կամ որ «ժամանակը գոյություն չունի»:
- **Այն չի ցույց տալիս, որ ժամանակը «իրականում» էնտրոպիա է:** Էնտրոպիկ ժամացույցը մեկ կառուցված հերթագրում է, որը լավ է աշխատում այս համակարգում: Հոդվածը նշում է գաղափարական ազգակցություն thermal-ժամանակ հիպոթեզի հետ, բայց բաց է թողնում նույնիսկ այն հարցը, թե երկուսը արդյոք համընկնում են: «Էնտրոպիայից կառուցված ներքին ժամացույցը կարող է հերթագրել այս փորձը» պնդումը շատ ավելի նեղ է, քան «ժամանակը էնտրոպիա է»:
- **Արդյունավետ հավասարումը մոդելավորման արդյունք է, ոչ քվանտային մեխանիկայի վերագրում:** Ստացված էնտրոպիկ ժամանակի Schrodinger հավասարումը դանդաղ էնտրոպիական հոսքի դեպքում վերադառնում է սովորական քվանտային մեխանիկային և խիստ իմաստով սովորական ունիտար տեսությունն է միայն երբ էնտրոպիայի հոսք ընդհանրապես չկա: Հոդվածը այն սովորական հավասարումից ավելի ընդհանուր է ներկայացնում *հատկապես այն դեպքում, երբ դիտվող համակարգը թերմոդինամիկորեն բաց է չդիտվող համակարգի նկատմամբ՝* այս տեսակի բաց ենթահամակարգերի մասին պնդում, ոչ հայտարարություն, որ հիմնարար ֆիզիկան պարտադիր պետք է այդպես վերագրվի:
- **Սա մեկ փորձ է, մեկ հեղինակ, մեկ ժամացույցային ընտրություն:** Արդյունքները մեկ կետի համար մոտ 5% վիճակագրական անորոշություն ունեն և հենվում են միջինդաշտ ու միջինացված խտության մոտարկումների վրա: Ընտրված ժամացույցը և coarse-graining-ը դիտավորյալ մոդելային որոշումներ են, որոնց այլ խմբեր կուգեն ստուգել՝ կառուցվածքային եզրակացություններ անելուց առաջ:

Որքան ուժեղ են ապացույցները

Իրականում պնդվող համեստ բանի համար ապացույցները մաքուր են: Համակարգը համապատասխան ժամանակային մասշտաբում իսկապես լավ մեկուսացված է, Էնտրոպիայի հաշվեկշիռը փակվում է՝ ընդհանուր Էնտրոպիան սխալի սահմաններում հաստատուն է, ներքին ժամացույցը գրեթե ամենուր տվյալները միատոն կերպով հերթագրում է, իսկ հեղինակի նույն մոդելից բերված և տվյալներից գնահատված պարամետրերով արդյունավետ հավասարումը վերարտադրում է չափված դինամիկան այն ցածր պատմեշի դեպքում, որի վրա կիրառվել է: Տվյալները բաց հասանելի են: Սա իրական, վերահսկվող համակարգի իրական չափում է, ոչ մտային փորձ:

Այն ծանրությունը, որը սա կարող է կրել, համապատասխանաբար համեստ է: Ամեն ինչ հենվում է կոնդենստի նվազեցված մոդելի և minisuperspace տիեզերագիտության անալոգիայի վրա, իսկ անալոգիաները կարող են լուսաբանել՝ առանց ապացուցելու: Մեկ հարթակ, մեկ հեղինակից, որը ցույց է տալիս մեկ ներքին ժամանակի բաղադրատոմսի աշխատանքը, ուժեղ սկզբունքի ապացույց է և թույլ հիմք բնության մեջ ժամանակի վարքի մասին պնդումների համար: Ճիշտ ընթերցումը սա է. մեթոդն այժմ կարելի է *անել* լաբորատորիայում և ստուգել:

Ինչու է սա կարևոր

Ժամանակի խնդրի քննարկումները երկար ժամանակ մնացել են ֆորմալիզմի մակարդակում, որտեղ մրցակից առաջարկները դժվար է հերքել, որովհետև կոնկրետ, չափելի կանխատեսումներ քիչ են տալիս: Այդ վեճի թեկուզ մեկ անկյունը դարձնել փորձ, որը կարելի է գործարկել՝ որտեղ ներքին ժամացույցը կամ հերթագրում է տվյալները, կամ ոչ, իսկ արդյունավետ հավասարումը կամ ֆիթվում է, կամ ոչ, փոխում է քննարկման բնույթը: Դա տեսաբաններին տալիս է լաբորատոր «նստարան», որի վրա կարող են ստուգել իրենց գործիքները:

Սա է իրական ներդրումը՝ ոչ ժամանակի մասին պատասխան, այլ **տեղ, որտեղ հարցը կարելի է քանակապես տալ**: Սառը ատոմների հարթակներն արդեն ծառայել են որպես Hawking ճառագայթման, ընդարձակվող տիեզերքների և կեղծ վակուումի քայքայման վերահսկվող անալոգներ: Սա այդ գործիքակազմին ավելացնում է հարաբերական ժամանակն ու ժամանակի սլաքը: Արժեքը այն հետագա աշխատանքների մեջ է, որոնք հնարավոր է դարձնում՝ տարբեր ժամացույցային ընտրություններ, bounce-ային ընդդեմ singular վարքի, հետադարձելիության փորձեր՝ ամեն մեկը հիմա չափում, ոչ միայն հաշվարկ:

Կարճ ամփոփում

Ֆիզիկոսը կառուցել է Bose-Einstein կոնդենսատ, բարակ օպտիկական պատնեշով այն բաժանել դիտվող և չդիտվող կեսերի և կեսերի միջև հոսող Էնտրոպիան օգտագործել ներքին «Էնտրոպիկ ժամանակ» կառուցելու համար: Այդ ժամացույցը հերթագրում է դիտվող կեսի ընդարձակման ու հետկծկման ցիկլը՝ արագ աշխատելով, երբ Էնտրոպիա է փոխանակվում, և կանգնելով, երբ փոխանակում չկա: Այս ներքին ժամանակով գրված արդյունավետ հավասարումը վերարտադրում է հեղինակի ուսումնասիրած ցածր պատնեշի դեպքում չափված տվյալները: Սարքավորումը կանոնական քվանտային գրավիտացիայի «Ժամանակի խնդրի» անայոգ է. «մեծ bang», «մեծ crunch» և «miniuniverse» բառերը պարզեցված տիեզերագիտական մոդելին մաթեմատիկորեն նման թակարդված գազի պիտակներ են: Սա հարաբերական ժամանակադասարկման վերահսկվող փորձադաշտ է, ոչ ժամանակի խնդրի լուծում, ոչ իրական տիեզերքի մասին պնդում և ոչ ապացույց, որ ժամանակը «իրականում» Էնտրոպիա է:

Առանց չափազանցության

Ինչ է ցույց տալիս հոդվածը. Մեկ լավ մեկուսացված սառը ատոմային համակարգում Էնտրոպիայի փոխանակումից սահմանված ներքին ժամացույցը կարող է միատոն հերթագրել դիտվող դինամիկան, իսկ արդյունավետ «Էնտրոպիկ ժամանակի» հավասարումը վերարտադրում է չափված Էվոյուցիան ուսումնասիրված ցածր պատնեշի դեպքում:

Ինչն է հավանական, բայց չի ցուցադրվել. Որ Էնտրոպիկ կամ հարաբերական ժամանակը լավ նկարագրություն է իրական քվանտային գրավիտացիայում ժամանակի համար: Փորձը համատեղելի է նման կառուցումները լուրջ ընդունելու հետ, բայց բնության համար դրանք չի հաստատում:

Ինչ չի ցույց տալիս. Որ ժամանակի խնդիրը լուծված է, որ քվանտային գրավիտացիան լուծված է, որ տիեզերքը սկսվել է այս տեսակի մեծ bang-ով, որ տարածաժամանակը ատոմներից է առաջանում կամ որ «Ժամանակը գոյություն չունի»:

Հիմնական սահմանափակումները. Մեկ հարթակ, մեկ հեղինակ և մեկ ժամացույցային ընտրություն, մոտ 5% մեկկետային անորոշություն, միջինդաշտ ու միջինացված խտության մոտարկումներ և, ամենից առաջ, թակարդված կոնդենսատի ու պարզեցված տիեզերագիտական մոդելի միջև անայոգիայի վրա հենվելը:

Որքան վստահություն պետք է ունենա սովորական ընթերցողը. Բարձր վստահություն, որ փորձն իր համակարգում արել է այն, ինչ հաղորդում է: Ցածր վստահություն այս անայոգից դեպի իրական տիեզերքում ժամանակի մասին պնդումներ թռչելու նկատմամբ:

Աղբյուրներ

Barontini, Testing the problem of time with cold atoms, Physical Review Research 8, L022047 (2026)

<https://doi.org/10.1103/1h9j-df4k>